

等教育“十三五”规划教材

JIAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

金属材料凝固原理与技术

沙明红 郭庆涛 李娜 李胜利 李久慧 编著



冶金工业出版社
www.cnmip.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

金属材料凝固原理与技术

沙明红 郭庆涛 李娜 李胜利 李久慧 编著



北京
冶金工业出版社

2018

内 容 提 要

本书以金属材料凝固过程为主线,系统介绍了金属的结构与性质、凝固过程的三传、凝固热力学与动力学、合金的凝固及溶质再分配、凝固组织及其控制实例、凝固缺陷及其控制实例、大型铸件凝固技术及实例、连铸坯凝固技术及实例、快速成型技术及实例等,以实例反映凝固理论与技术的最新进展;各章附有相应的思考题。

本书为材料成型与控制专业和材料科学与工程专业本科生教材,也可供相关专业师生和相关领域的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料凝固原理与技术/沙明红等编著. —北京:
冶金工业出版社, 2018. 8

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7828-5

I. ①金… II. ①沙… III. ①液体金属—凝固理论—
高等学校—教材 IV. ①TG111.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第157489号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 赵亚敏 宋 良 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郭惠兰 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7828-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2018年8月第1版,2018年8月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 10.75印张; 260千字; 163页

25.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

本书以转型发展中的应用型人才培养为指导思想，以专业实用性为原则，集理论知识与创新实践于一体，主要内容包括金属材料凝固理论和凝固技术两大部分：凝固理论部分主要包含液态金属的结构与性质、凝固过程三传、凝固热力学与动力学、合金的凝固等；凝固技术部分包括凝固组织及其控制、凝固缺陷及其控制，以及大型铸件凝固、连铸坯凝固和快速成型等凝固技术。本书的特点是用团队的科研实验和联合企业的生产实际作为各章节的实例进行教学，实例具体可操作，具有较高的实用性，可为地方高校转型发展培养应用型人才提供教学用书。本书由沙明红主编，第1章、第3章、第5章、第7章和第10章由沙明红编写，第2章和第4章由李娜编写，第6章由沙明红和郭庆涛合作编写，第8章由李胜利编写，第9章由郭庆涛和李久慧合作编写。张峻巍教授、于德川博士、关锐硕士、毛建强硕士、郑婷硕士等也参加了本书的部分编写和校对工作，编者对他们表示衷心的感谢！在编写过程中，参考了许多文献，引用了一些文献中的文字、图表，在此也向文献作者表示衷心的感谢！

由于编者水平所限，书中疏漏之处，诚请读者批评指正。

编 者

2018年5月

目 录

1 绪论	1
1.1 凝固技术在材料成型中的作用	1
1.2 金属凝固理论与技术的发展	1
1.2.1 凝固理论的发展	2
1.2.2 凝固技术的发展	3
思考题	6
2 液态金属的结构与性质	7
2.1 液态金属的结构	7
2.1.1 液体与固体、气体的原子排序特点比较	7
2.1.2 由物质熔化过程认识液体结构	7
2.1.3 实际液态金属的结构特点	8
2.2 液态金属的性质	8
2.2.1 液态金属的黏度	8
2.2.2 液态金属的表面张力	9
2.2.3 液态金属的流动性及充型能力	10
2.3 金属的凝固与结晶	12
2.3.1 金属的结晶	12
2.3.2 非晶体金属的结构与性能	13
思考题	15
3 凝固过程的传热	16
3.1 凝固过程的传热	16
3.1.1 凝固过程的传热特点	16
3.1.2 界面热阻与传热	17
实例 3-1 $\phi 100$ 铝硅合金铸件在砂型和金属型中凝固的测温结果和凝固组织	18
3.2 凝固时间的计算	19
3.2.1 平方根定律法	19
3.2.2 当量厚度法	20
3.3 液态金属凝固温度场	20
3.3.1 铸件温度场的研究方法	20
3.3.2 铸件温度场的影响因素	21

3.3.3 铸件凝固方式及其影响因素	22
思考题	23
4 金属凝固热力学与动力学	24
4.1 凝固热力学	24
4.1.1 液-固相变驱动力	24
4.1.2 溶质平衡分配系数 (K_0)	26
4.1.3 曲率、压力对物质熔点的影响	26
4.2 凝固动力学	27
4.2.1 均质形核	28
4.2.2 非均质形核	29
4.3 纯金属的晶体长大	30
4.3.1 固-液界面的微观结构	31
4.3.2 晶体长大机制	32
4.3.3 晶体宏观生长方式	34
思考题	35
5 合金的凝固	36
5.1 凝固过程溶质再分配	36
5.1.1 溶质再分配	36
5.1.2 液相充分(均匀)混合时的溶质再分配	38
5.1.3 液相有限扩散时的溶质再分配	39
5.1.4 液相中部分混合时的溶质再分配	40
5.2 合金凝固界面前沿的成分过冷	41
5.2.1 成分过冷	42
5.2.2 影响成分过冷的因素	42
5.3 成分过冷对单相固溶体合金结晶形态的影响	43
5.3.1 “成分过冷”对固溶体合金晶体形貌的影响规律	43
5.3.2 枝晶间距	44
5.4 共晶及包晶合金的凝固	45
5.4.1 共晶相图及其合金的结晶	45
5.4.2 包晶相图及包晶反应合金的结晶	47
思考题	50
6 铸件宏观组织及其控制技术	51
6.1 铸件的宏观组织及其形成机理	51
6.1.1 铸件的宏观组织	51
6.1.2 铸件宏观组织的形成机理	52
6.2 铸态组织对铸件机械性能的影响	54

6.2.1 表层细晶区	54
6.2.2 柱状晶区	54
6.2.3 等轴晶区	55
6.3 铸态组织的控制途径	55
6.3.1 凝固过程的传热	56
6.3.2 细化晶粒的措施	57
6.3.3 定向凝固技术	59
实例 6-1 Sn-Bi 合金双侧定向凝固实验	64
6.3.4 快速凝固技术	67
实例 6-2 真空甩带法制备快速凝固薄带	71
6.3.5 半固态成型技术	72
实例 6-3 铝硅合金半固态浆料制备及凝固组织研究实例	83
6.4 非晶合金的制备技术	86
6.4.1 非晶合金的应用	86
6.4.2 非晶合金的制备	88
实例 6-4 Zr-Al-Ni-Cu-Ag 系大块非晶的制备	88
6.5 真空及电磁场对液态成型过程的影响	89
6.5.1 真空对液态成型的影响	89
6.5.2 电磁场对液态成型的影响	89
思考题	91
7 凝固缺陷及其控制	93
7.1 缩孔和缩松	93
7.1.1 凝固过程中的收缩	93
7.1.2 铸件的缩孔和缩松	94
7.2 应力、变形和裂纹	96
7.2.1 铸造应力	97
7.2.2 铸件变形	98
实例 7-1 T形奥氏体钢铸件的冷却变形	99
7.2.3 铸件的裂纹	99
7.3 铸件化学成分的不均匀性	103
7.3.1 微观偏析	103
7.3.2 宏观偏析	104
7.4 气孔和非金属夹杂物	107
7.4.1 气孔及其分类	107
7.4.2 非金属夹杂物	109
实例 7-2 普碳钢圆锭浇铸气缩孔缺陷实例	110
思考题	111

8 大型铸件的凝固	113
8.1 铸锭	114
8.1.1 大型钢锭的发展现状	114
8.1.2 钢锭及其分类	115
8.1.3 钢锭的质量	116
8.1.4 钢锭的浇注工艺	116
8.2 钢锭的凝固	118
8.2.1 钢锭凝固	118
8.2.2 铸件凝固过程数值模拟	119
8.2.3 凝固缺陷及其控制	120
实例 8-1 3t 钢锭结构设计及其凝固过程数值模拟	124
实例 8-2 3t 方钢锭浇钢实例	126
思考题	128
9 连铸坯的凝固	130
9.1 连续铸钢的发展与现状	130
9.2 连铸坯的凝固	131
9.2.1 连铸坯的凝固进程	131
实例 9-1 连续铸钢结晶器内传热数值模拟研究	134
9.2.2 连铸坯的凝固组织	134
9.3 连铸坯质量	136
9.3.1 连铸坯的形状缺陷	137
9.3.2 工艺参数对结晶器出口处坯壳厚度的影响	140
9.3.3 连铸保护渣	141
9.3.4 改善连铸坯质量的新技术	143
实例 9-2 高质量小方坯和圆坯研发实例	145
思考题	150
10 金属快速成型技术	151
10.1 金属快速成型的概念、原理及其发展	151
10.1.1 快速成型的概念、原理及特点	151
10.1.2 快速成型及其制造技术的发展	152
10.2 激光快速成型及其应用	154
10.2.1 激光快速成型及其分类	154
10.2.2 激光快速成型的应用	157
10.2.3 激光快速成型的发展现状	159
实例 10-1 激光熔覆快速成型三维金属框制备实验	160
思考题	161
参考文献	163

1.1 凝固技术在材料成型中的作用

材料加工主要包括热加工和冷加工两大类，如图 1.1 所示。热加工包括铸造（液态成型）、塑性成型（轧制、锻压、挤压拉拔等）、焊接、热处理，近年来又兴起了增材制造（涂层技术、表面改性等）；冷加工主要是机械加工领域的车、铣、刨、磨、钳等。冷热两大加工是装备制造业的工艺基础。

铸造是将满足成分要求的液态金属在重力场或其他力场的作用下引入预制的铸型型腔中，经冷却使其凝固成为具有一定形状和性能的固态铸件或铸坯的方法，也称为液态成型，凝固是其成型的核心。铸造属于典型的热加工成型，其产品是铸件或铸坯。铸造产品既可以作为成品件使用，也可以作为后续塑性成型、焊接成型及切削成型的原料。铸造是连接冶金与材料成型的关键环节，是材料加工的第一步，铸件的质量直接影响产品的性能。铸坯（锭）经过轧制（锻压）、热处理、焊接等成型过程后制成各种板材、型材等，铸坯的组织对后续加工有一定的遗传性，间接影响着产品性能。凝固是新材料研制的重要手段，是非晶、准晶、纳米等非平衡新材料研制的重要途径。控制熔化是新材料合成及材料加工的重要手段，主要体现在半固态加工过程中溶质的扩散、液相形成与分布及固相形貌的控制等。凝固过程控制及其相关的熔化过程研究是决定金属材料制备水平和新材料研制能力的重要技术科学领域，是制造业的重要组成部分，在国民经济中占有重要地位。

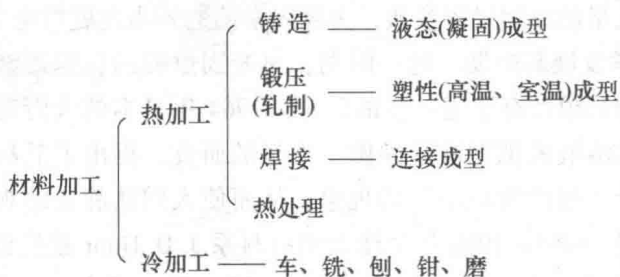


图 1.1 材料加工方法

1.2 金属凝固理论与技术的发展

金属凝固学就是研究液态金属转变成固态金属这一过程的理论和技术。包括定性和定量地研究其内在联系和规律；研究新的凝固技术和工艺，以提高金属材料的性能或开发新的金属材料成型工艺。

1.2.1 凝固理论的发展

物质由液态转变为固态的过程,称为凝固。凝固是液态成型的核心,它影响着铸件的凝固组织(如晶粒形态及大小)和凝固缺陷(如缩孔、裂纹、偏析、气孔和非金属夹杂物等)的形成,进而决定了产品的凝固质量和力学性能。凝固理论建立的基础是传热学、物理化学、金属学及流体力学等。

凝固理论的发展可分为三个阶段:

(1) 20世纪60年代前诞生了经典凝固理论。1945—1950年美国哈佛大学D. Turnbull将Volume-Webber-Becker-Doring形核理论引入凝聚态体系,创立了凝固过程形核理论。该理论认为,凝固首先是成核,接着是核心长大直至成为固态。在多伦多大学B. Chalmers的指导下,许多著名的凝固学家脱颖而出。他们在对凝固界面附近溶质分析求解的基础上,总结出“成分过冷”理论,并提出了可操作性的成分过冷判据,首次将传热和传质耦合起来,研究其对晶体生长方式和形态的影响。1961年出版了国际上第一本凝固理论专著《Principles of Solidification》。Flemings(MIT)等从工程的角度出发,研究了两相区内液相流动效应,提出了局部溶质再分配方程等理论模型,推动了凝固科学的发展。捷克的Chvorinov通过对大量逐渐凝固冷却曲线的分析,引入了铸件模数的概念,按照模数理论,铸件的凝固时间取决于它的体积和传热表面积之比,用 $M=V/A$ 表示,建立了求解铸件凝固层厚度和铸件凝固时间的数学方程,导出了著名的平方根定律。该定律至今仍是铸造工艺设计的重要理论依据。综上所述,经典凝固理论主要包括晶体生长、晶体缺陷生长、成分过冷、凝固过程扩散场理论解、两相区流动效应、平方根定律等。

(2) 20世纪60年代后的应用研究与新技术开发。经典凝固理论诞生后很长一段时间,研究的重点放在经典理论的应用上,以提高材料质量、降低产品成本为目标,出现了先进的凝固技术和材料成型方法,例如,快速凝固、定向凝固、激光表面重熔技术、半固态铸造等,积累了大量的凝固过程参数,为凝固学的进一步发展奠定了基础。

(3) 近代凝固学发展新时期。这一时期,对凝固过程的认识逐渐从经验主义中摆脱出来,对经典理论的局限性有了进一步的认识。1964年日本的大野笃美受北大西洋冰山的启发,用氯化铵水溶液模拟钢液凝固做了大量的研究,提出了晶粒游离和晶粒增殖理论,发现了凝固前沿“过冷度减小”的现象,从而使人们从静止的观点发展到用动态的观点来分析凝固过程。1965—1968年牛津大学材料系J. D. Hunt教授创立了J-H经典共晶生长理论;1982年哈佛大学应用科学部M. J. Aziz博士提出了快速凝固溶质截留理论。近30年,由于科技的进步、计算机和计算技术的迅猛发展,人们有可能进行极端条件下的凝固过程和特殊条件下的凝固过程的研究,定量地描述液态金属的凝固过程,可以对凝固过程和凝固缺陷进行预测,采用计算机辅助设计的方法有效地控制凝固过程,极大地缩短了研究进程、降低了投入。在此基础上,出现了许多新的凝固理论和模型,其将温度场、应力场、流动场耦合起来进行研究。近10年,又出现了全流程模拟研究,即将宏观物理场与微观组织、溶质等联系在一起,提出了多尺度模型及其理论,能够进行多尺度数值模拟,其结果更接近于实际。

1.2.2 凝固技术的发展

凝固技术是以凝固理论为基础进行凝固过程控制的工程技术，是对各种凝固过程控制手段的综合应用。凝固术最古老的技术是冶铸技术，我国冶铸技术已有 5000 多年的历史，公元前 3000 年为青铜器时代，公元后 2000 年为铁器时代，代表性的铜器和铁器如图 1.2 所示。铜器和铁器的制造是一个典型的熔化、凝固过程，它包括合金配制、凝固控制、组织控制。

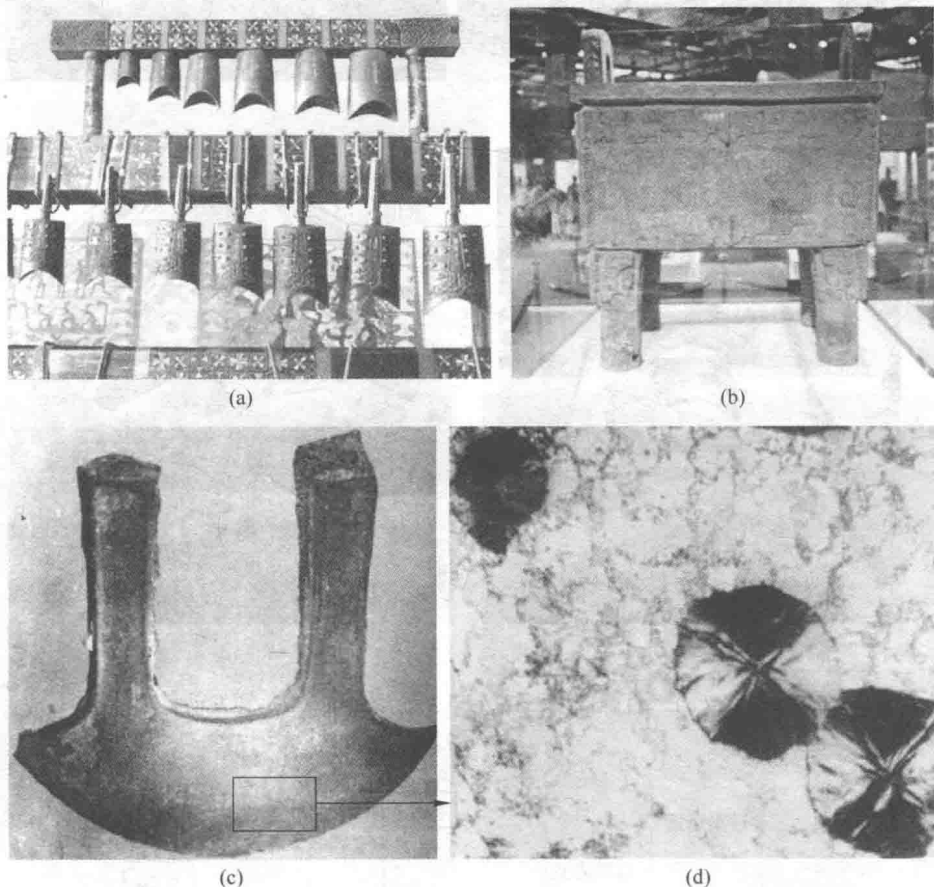


图 1.2 古代青铜器与铁器

近代随着科学技术的发展，凝固技术的应用和研究取得了长足的发展，为工业、冶金、航空航天、航海、交通运输等领域提供了重要的产品和原料，如图 1.3 所示。

根据造型方法的不同，铸造分为砂型铸造和特种铸造。砂型铸造是铸型由型砂制成的铸造方法；特种铸造是铸型不同于砂型铸造的铸造方法。根据铸型材料和铸造条件的不同，特种铸造分为金属型铸造、熔模铸造、消失模铸造、压力铸造和离心铸造等。根据铸件凝固过程中与铸型是否有相对运动，铸造又可以分为模铸和连续铸造。模铸是铸件在铸型内凝固，模铸法的主要工艺流程如图 1.4 (b) 所示；连续铸造是铸件相对于结晶器是运动的，铸坯从结晶器一冷区运动到二冷喷水冷却区，再经空冷区完成凝固过程，得到铸坯的铸造方法。图 1.5 所示是不同发展阶段铸机的机型及弧形连铸机图片。我国是铸造大国，连铸产量在铸件产量中占 95% 以上。

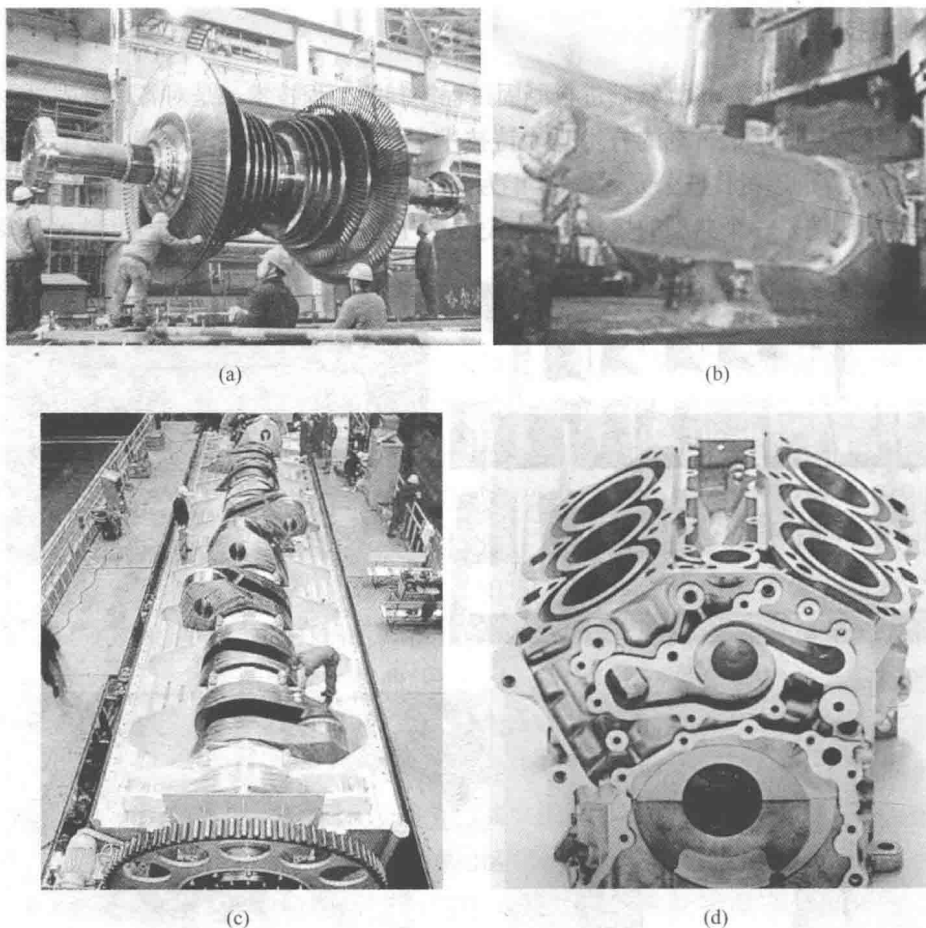


图 1.3 汽轮机 (a)、百吨以上圆锭 (b)、船用曲轴 (c) 和发动机缸体 (d)

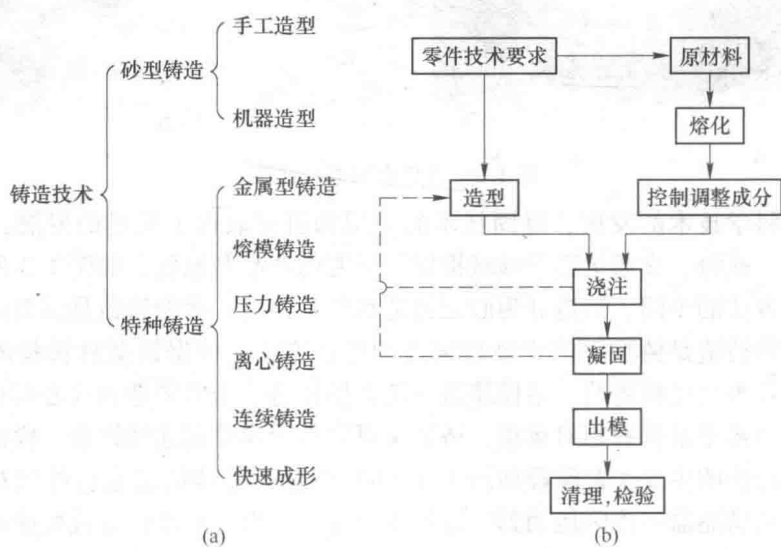


图 1.4 铸造技术及模铸法 (a) 分类和 (b) 主要工艺流程

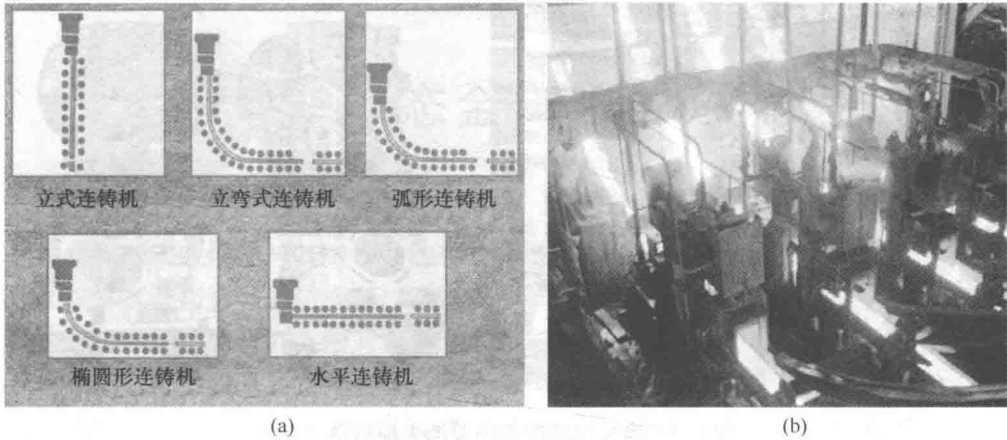


图 1.5 连铸机的机型 (a) 及圆坯弧形连铸机 (b)

目前，模铸产量较小，但是模铸在某些领域是不可替代的，砂型铸造、金属型铸造、熔模铸造和消失模铸造等铸造方法在工业、农业、国防等领域仍然发挥着巨大的作用，如图 1.6~图 1.8 所示。

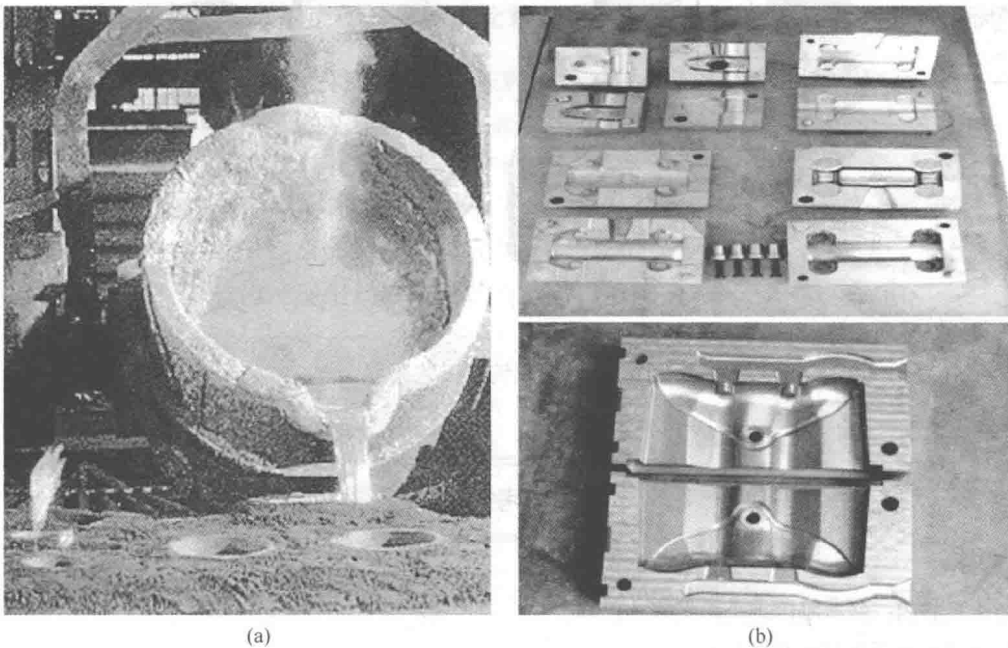


图 1.6 砂型铸造 (a) 及金属型铸造 (b)

随着对铸态组织和铸件（铸坯）综合性能要求的不断提高，又出现了半固态成型技术、快速凝固技术、非晶制备技术等。装备制造业的发展催生了一种基于离散堆积成型思想的新型成型技术——快速成型技术，亦称“3D 打印”技术，是集成计算机、数控、激光和新材料等最新技术而发展起来的先进的产品研究与开发技术。铸造工艺过程控制和铸造技术的不断进步与发展，为生产高品质铸件（铸坯），进而为生产高附加值的轧制、锻压、机械加工和热处理产品及装备奠定了基础，推动了工业、航空航天、国防、军工、航海等领域的高端产品的研发与生产。

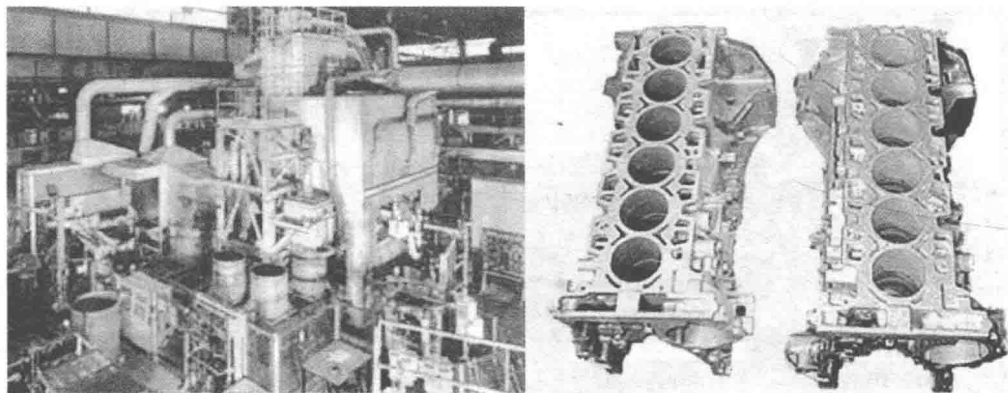


图 1.7 消失模铸造现场及消失模铸造产品

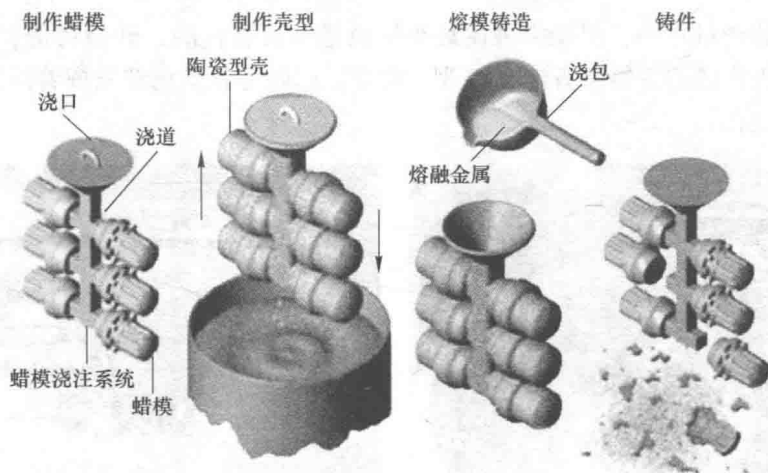


图 1.8 熔模铸造工艺流程

思考题

- 1.1 什么是凝固，经典凝固理论包括哪些内容？
- 1.2 凝固技术的研究领域有哪些？
- 1.3 什么是铸造，铸造方法有哪些？
- 1.4 凝固技术在材料加工中的作用是什么？
- 1.5 根据凝固技术的现状，简述现代凝固理论与凝固技术发展的新特点。

2

液态金属的结构与性质

金属材料的宏观性能与其微观结构有着密切关系，液态金属的结构决定了液态金属的基本性质，掌握液态金属的结构和性质对研究熔化、成型过程、凝固组织及性能有着重要意义。液态金属结构的研究方法有直接法和间接法两种。直接法是用 X 射线衍射、中子衍射及电子衍射等手段直接测定金属的液态结构，研究其原子排列情况；间接法是通过测定密度、黏度和电阻率等对结构敏感的物性参数，根据测量结果，推断液态金属结构的变化。

2.1 液态金属的结构

2.1.1 液体与固体、气体的原子排序特点比较

(1) 固体。平移、对称性特征（即，长程有序）。原子以一定方式周期排列在三维空间的晶格结点上，同时原子以某种模式在平衡位置上做热振动。

(2) 气体。完全无序为特征，分子不停地作无规律运动。

(3) 液体。长程无序——不具备平移、对称性；

近程有序——相对于完全无序的气体，液体中存在着许多不停“游荡”着的局域有序原子集团，液体结构表现出局域范围的有序性（图 2.1）。

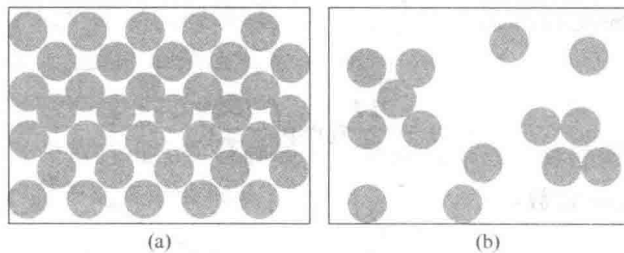


图 2.1 “长程有序”和“近程有序”的原子排列

(a) 长程有序；(b) 近程有序

2.1.2 由物质熔化过程认识液体结构

物质熔化时体积变化、熵变（以及焓变）一般均不大，金属熔化时典型的体积变化 V_m/V_s (V_m 为熔化时的体积增量) 为 3%~5% 左右，表明液体的原子间距接近于固体，在熔点附近其混乱度只是稍大于固体而远小于气体的混乱度。金属熔化潜热 H_m 比其气化潜热 H_b 小得多，为 1/15~1/30，表明相对于气化，熔化时其内部原子结合键只有部分被破坏。因此，液态金属结构接近固态而远离气态，这已被大量的试验数据所证实。

2.1.3 实际液态金属的结构特点

(1) “能量起伏”。液态金属内部时聚时散的原子集团因自身带有不同的能量，而引起的液态金属内部各集团的能量变化。

(2) “结构起伏”。液体中大量不停“游动”着的局域有序原子团簇时聚时散、此起彼伏，也叫“相起伏”。

(3) “浓度起伏”。同种元素及不同元素之间的原子间结合力存在差别，结合力较强的原子容易聚集在一起，把别的原子排挤到别处，表现为游动原子团簇之间存在着成分差异。

2.2 液态金属的性质

2.2.1 液态金属的黏度

2.2.1.1 黏度系数

黏度系数简称黏度（动力学黏度 η ），是根据牛顿提出的数学关系式来定义的：

$$\tau = \eta \frac{dv_x}{dy} \quad (2.1)$$

式中 τ ——平行于 x 方向作用于液体表面（ x - z 面）的外加剪切应力；

v_x ——液体在 x 方向的运动速度；

dv_x/dy ——沿 y 方向的速度梯度。

液体黏度量纲为 $[M/LT]$ ，常用单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 或 $\text{MPa} \cdot \text{s}$ 。要产生相同的 dv_x/dy ，液体内部摩擦阻力越大，即 η 越大，所需外加剪切应力也越大。

2.2.1.2 影响黏度的因素

黏度的表达式：

$$\eta = \frac{2kT}{\delta^3} \tau_0 \exp\left(\frac{U}{k_B T}\right) \quad (2.2)$$

式中 k_B —— Boltzmann 常数；

T ——温度；

k ——弹性模量；

U ——无外力作用时原子之间的结合能；

τ_0 ——原子在平衡位置的振动周期；

δ ——液体各原子层之间的间距。

A 温度

黏度随原子间距 δ 增大而降低（成反比）（图 2.2）。实际金属液的原子间距 δ 非定值，温度升高，原子热振动加剧，原子间距增大， η 随之下落； η 与温度 T 的关系受两方面（正比的线性关系

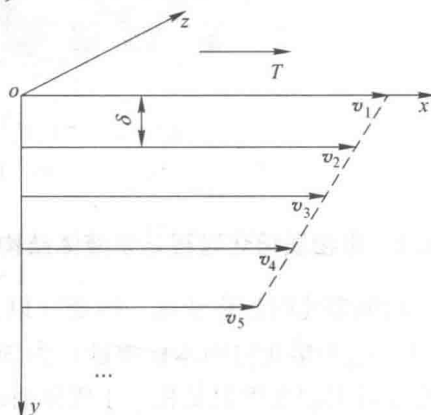


图 2.2 外力作用于液体表面各原子层的速度

和负的指数关系) 所共同制约, 通常, 总的趋势是随温度 T 的升高而下降。

B 合金组元 (或微量元素) 对合金液黏度的影响

表面活性元素 (能以极低的浓度显著地降低溶剂的表面张力的一类物质称为表面活性剂, 如向 Al-Si 合金中添加的变质元素 Na) 能使液体黏度降低, 非表面活性杂质的存在使黏度提高。若溶质与溶剂在固态形成金属间化合物, 则合金液的黏度将会明显高于纯溶剂金属液的黏度。因为合金液中存在异类原子间较强的化学结合键。若混合热 H_m 为负值, 合金元素的增加会使合金液的黏度上升 (H_m 为负值表明反应为放热反应, 异类原子间结合力大于同类原子, 因此摩擦阻力及黏度随之提高)。

2.2.1.3 黏度对成型质量的影响

A 铸件轮廓的清晰程度

在薄壁铸件的铸造过程中, 流动管道直径较小, 雷诺数 (雷诺数 (Reynolds number) 是流体力学中表征黏性影响的相似准数。为纪念 O. 雷诺而命名, 记作 Re 。 $Re = \rho v L / \mu$, ρ 、 μ 为流体的密度和黏度, v 、 L 为流场的特征速度和特征长度) 小, 流动性质属于层流。此时, 黏度越高, 铸件充型越困难, 轮廓清晰程度越差。为降低液体的黏度, 应适当提高过热度或者加入表面活性物质等。

B 热裂、缩孔、缩松的形成倾向

由于凝固收缩形成压力差而造成的自然对流均属于层流性质, 此时黏度对流动的影响就会直接影响铸件的质量。黏度越高, 热裂、缩孔、缩松的形成倾向越大。

C 钢铁材料的脱硫、脱磷、扩散脱氧

在铸造合金熔炼过程中, 冶金化学反应均是在金属液与熔渣的界面进行的, 金属液中的杂质元素及熔渣中反应物要不断地向界面扩散, 同时界面上的反应产物也需离开界面向熔渣内扩散。这些反应过程的动力学 (反应速度和可进行到何种程度) 受到反应物及生成物在金属液和熔渣中的扩散速度的影响, 金属液和熔渣的动力学黏度 η 低有利于扩散的进行, 从而有利于脱去金属中的杂质元素。

D 精炼效果及夹杂或气孔的形成

黏度 η 较大时, 夹杂或气泡上浮速度较小, 精炼效果差; 铸件凝固过程中, 夹杂物和气泡难以上浮排除, 易形成夹杂或气孔。

2.2.2 液态金属的表面张力

2.2.2.1 液态金属的表面张力

表面张力是表面上平行于表面切线方向且各方向大小相等的张力。表面张力是由物体在表面上的质点受力不均造成的。由于液体或固体的表面原子受内部的作用力较大, 而朝着气体的方向受力较小, 这种受力不均引起表面原子的势能比内部原子的势能高。因此, 物体倾向于减小其表面积而产生表面张力。

2.2.2.2 影响表面张力的因素

(1) 表面张力与原子间作用力的关系:

原子间结合力 $u_0 \uparrow \rightarrow$ 表面内能 $\uparrow \rightarrow$ 表面自由能 $\uparrow \rightarrow$ 表面张力 \uparrow 。